المقدمة :

يمثل موضوع الدفع الكهربائي للصواريخ والسفن الفضائية مجالا مثيرا من مجالات العلم و التكنولوجيا . ان استخدام هذا النوع من الدفع يمثل في الوقت الحاضر الطريق المعقول الوحيد المتوفر امام الانسان اذا اراد استكشاف الفضاء الموجود خارج نطاق المجموعة الشمسية بطريقة اقتصادية تتضمن نقل بعثات بشرية مع حمولات كبيرة نسبيا الى الكواكب المجاورة او الى الاماكن الابعد من ذلك في الفضاء .

ان تبني فكرة كهذه تعتمد على معلومات وخبرات اساسية في عدد كبير من المجالات في الفيزياء والتكنولوجيا يجعل مسالة القيام ببحوث ودراسات مكثفة وواسعة في هذه المجالات ام لا مفر منه . ان المسالة هنا هي بناء نظام للدفع الكهربائي النفاث ويمكن مبدئيا القول بان اي نظام كهذا يمكن ان يتكون من ثلاث اجزاء رئيسية هي :

- مفاعل نووي خفيف الوزن لتوليد الطاقة .
- طريقة كفوءة لتحويل الطاقة الحرارية الى طاقة كهربائية .
- محرك الدفع نفسه .

ان الحاجة الى الجزأين الاول والثاني اعلاه في هذا النظام المقترح قد ادت الى دفع كبير لحركة البحوث الاساسية والتطبيقية في مجالات المفاعلات النووية التي تعمل عند درجات حرارة عالية والى طرق تحويل الطاقة المتولدة من هذا النوع من المفاعلات الى طاقة كبيرة بشكل مباشر باستخدام اجهزة ثنائيات البلازما او مولدات MHD .

ان الجزء الثالث وهو محرك الدفع نفسه سيكون موضع اهتمامنا هنا وكما سنلاحظ فان اساس عمل هذا المحرك يعتمد على قاعدة واسعة من الحقائق النظرية بفيزياء البلازما اضافة الى حركيات الحزم الجسمية والبصريات الالكترونية . ان هدفنا هنا سوف ينصب على مناقشة هذا النوع من اجهزة الدفع على ضوء هذه الاسس عوضا عن تقديم صورة تفصيلية للعدد المتزايد من التطورات الهندسية الخاصة بهذا الموضوع ولذلك فان المناقشة سوف تأخذ الاتجاه العام المتعلق بالمحاولات الموجودة في الوقت الحاضر لمعالجة بعض المشاكل الخاصة بفيزياء البلازما وحركيات الجسيمات اضافة الى كيفية توليد الحزم الايونية . واعتمادا على الحقيقة القائلة بان اي مشروع (محرك الدفع الصاروخي بالبلازما في هذه الحالة) يعتمد في نجاحه اساسا على استمرار العملية الاساسية في ذلك المجال اضافة الى النتائج التي تسفر عنها هذه البحوث في معالجة مشاكل اخرى خارج نطاق مشروع البحث .

يمكن ان تتضح اهمية استغلال البلازما بهدف بناء محرك دفع صاروخي من خلال المعادلة :

$$\upsilon = \upsilon e_x \ \ln \frac{M_R}{M_0}$$

والتي تبين ان مقدار فعالية صرف الكتلة للحصول على سرعة الصاروخ يمكن انت تقاس مباشرة بدلالة سرعة دفع الغازات الى الخلف وبعنى اخر فان تحقيق زيادة معينة في سرعة الصاروخ يمكن ان يتحقق اكبر في استخدام الوقود كلما ازدادت سرعة خروج الغازات .

ان معدل الخسارة في الكتلة في المحركات الصاروخية ذات الوقود الكيميائي الاعتيادي يكون كبيرا في حين تكون سرعة اندفاع الغازات واطئة ولهذه المحركات دفعا عاليا طبعا يكفي للتغلب على قوة الجاذبية لغرض ايصال الحمولة الى المدارات الارضية المطلوبة , ولكن ولهدف تحقيق العديد من المشاريع المستقبلية والتي سيبدأ انطلاقها من مدارات حول الارض والى الفضاء الخارجي فان كمية الوقود الكيميائي اللازم لنقل حمولات ضخمة ستكون كبيرة بشكل غير معقول. ان سرعة نفث الغازات في هذه المحركات ستكون بحدود لا تتجاوز 4000 متر / ثانية والسبب في ذلك ناتج عن اقصى درجة حرارة للتفاعلات الكيميائية واقل وزن جزيئي للوقود المستعمل .وان اختيار الهيدروجين كوقود وباستخدام مفاعل نووي ينقل الحرارة الى الهيدروجين مباشرة يمكن ان يجعل هذه السرعة تصل الى 8000 متر /ثانية ولكن لا يمكن زيادة السرعة عن ذلك بسبب عدم تحمل المواد المستخدمة في بناء المحرك حرارات تزيد عن تلك التي تعطينا هذه السرعة .

ان استخدام المحركات الصاروخية التقليدية سيكون مهما في الرحلات الفضائية القريبة من الارض وذلك بسبب مقدار الدفع الكبير الذي تحققه في حين ستكون الرحلات ما بين الكواكب والرحلات الفضائية البعيدة وبحمولات عالية مستحيلة التحقيق باستخدام محركات تقليدية وبذلك يصبح استعمال اية محركات ذات دفع واطئ ولكن تستطيع العمل لفترات طويلة وبسرعة نفث عالية جدا للغازات امرا محتوما لغرض تحقيق اهداف من هذا النوع .

الدفع الايوني (ion thruster):

من الواضح طبعا ان الممكن تعجيل الايونات الى اية سرعة عالية مطلوبة باستخدام المجالات الكهروستاتيكية او الكهرومغناطيسية .

ان مقدار السرعات النهائية التي يتم الوصول اليها مثل التعجيل ليس له علاقة بمقدار التسخين الحراري . ان مقدار القدرة اللازمة لتعجيل جسيم تتناسب طرديا مع حاصل ضرب الدفع والسرعة . ولما كان وزن المفاعلات النووية اللازمة لتوليد القدرة يتناسب طرديا تقريبا مع القدرة التي باستطاعتها توليدها ولذلك فسيكون هناك لكل رحلة فضائية مقدارا امثل لسرعة خروج الغازات او بمعنى اخر مقدارا للدفع النوعي ينتج عنه اقل وزن كلي ويمكن معرفة هذا المقدار من اجراء عملية موازنة دقيقة بين مجموعة توليد القدرة ووزن وقود الدفع .

ان السرعة المثلى للغازات ستكون اكبر في الرحلات الاطول مدى والحمولات الاكبر , ولكنها على كل حال يجب ان تكون في حدود تصل اكثر من بضع عشرات الالاف من امتار في كل ثانية فهي تتغير من حوالي 50000 متر /ثانية في حالة الحاجة الى نقل حمولة مقدارها 2000 كيلوغرام الى مدار حول المريخ والى حوالي 100000 متر/ثانية عند محاولة نقل محطة فضائية يصل وزنها الى 15 طنا الى كوكب الزهرة وتمثل المحركات الكهرونووية – الايونية حلا نموذجا لمثل هذا النوع من الرحلات .

لقد دلت الحسابات التفصيلية على انه في حالة كون مقدار الكتلة الكلية الابتدائية (الوقود+الحمولة) ثابتة فان من الممكن نقل حمولة بواسطة صواريخ الدفع بالبلازما تصل الى حوالي اربع مرات بقدر تلك التي يمكن نقلها بالصواريخ النووية خلال رحلات الذهاب والإياب وقد تصل هذه النسبة الى حوالي عشر مرات في بعض من الرحلات .

ان هناك عدة طرق تتم دراستها الان في كيفية تعجيل جسيمات البلازما الى سرعات عالية ويمكن تصنيف هذه الطرق الى ثلاث اصناف رئيسية تشترك جميعها في انها تستطيع توفير استهلاك قليل الوقود بكفاءة عالية وهذه الطرق هي :

- الطرق الكهروحرارية electrothermal
- الطرق الكهروستاتيكية electrostatic
- الطرق الكهرومغناطيسية electromagnetic

ويشمل النوع الاول من الاجهزة عدة طرق ثانوية تستخدم لتعجيل البلازما طريق تزويدها بحرارة عالية اما عن طريق تسخينها بواسطة مقاومة كهربائية او وحدات قوس كهربائي ولا تمثل هاتان الطريقتان تقدما كبيرا في تحقيق هدف التخلص من تأثير الدرجات العالية على المواد البنائية للمحرك حيث يسمح للغاز بالتمدد خلال فتحة nozzle تقوم بتحويل الطاقة الحرارية الى طاقة حركية والحد الاقصى للسرعة في هذه الحالة هو حوالي 100000 متر / ثانية حيث ان زيادة عن هذا الحد تؤدي الى تلف فتحة خروج الغازات بسبب درجة الحرارة العالية ويمكن معالجة هذه المشكلة باستخدام الفتحات المغناطيسية magnetic nozzles التي تعزل البلازما عن هيكل الفتحة .

توفر المحركات الكهروستاتيكية الايونية امكانيات كبيرة نحو تحقيق سرعات دفع عالية تصل الى بضع عشرات الالو من الامتار في الثانية وهي تعتمد على فكرة اساسية بسيطة جدا هي اعطاء طاقة حركية للجسيمات المشحونة عن طريق تعجيلها في مجال كهربائي . ولكن ورغم بساطة هذه الفكرة فان تحويلها الى امر واقع يواجه عددا من المشاكل المتعلقة باعتبارات اساسية في فيزياء البلازما والالكترونيات منها **اولا** وجوب وجود مصدر كفوء للايونات ويمكن استخدام عدد من المصادر المعروفة مثل تلك التي تعتمد على التأين بالتماس او تفريغ بيننك Penning او الاقواس الكهربائية ذات المجالات المغناطيسية وجميع هذه الانواع تجري عليها الان دراسات لاختبار مدى صلاحياتها .**وثاني** هذه المشاكل هي تلك المتعلقة بالأجهزة البصرية الخاصة بتجميع وتعجيل الحزم الايونية كالعدسات المغناطيسية وغيرها .اما **الثالث** فهي تلك الخاصة بالتعادل الكهربائي .

ان النوع الثالث في محركات الدفع تتضمن عملية تعجيل البلازما باستخدام المجالات المغناطيسية . وهنا ايضا توجد عدة طرق للتعجيل منها استخدام مجالات كهربائية ومغناطيسية ثابتة مشابهة لتلك المستخدمة في مولدات MHD او استخدام الترددات الراديوية للموجات الكهرومغناطيسية وتواجه هذا النوع من عمليات التعجيل مشاكل اساسية منها تحويل الطاقة وتوليد واحتواء البلازما في درجات الحرارة العالية اضافة الى الهدف المطلوب وهو تحقيق كفاءة عالية .

بعض المشاكل الرئيسية :

تتضمن عمليات تطوير محركات الدفع بالبلازما عدة اهداف تكنولوجية هي في واقعها مشتركة لجميع الطرق المقترحة التي مر ذكرها و اول هذه الاهداف هو تصميم ترتيب للمجالات (المغناطيسية و(او) الكهربائية) يكون قادرا على تعجيل الجسيمات المشحونة بشكل مسيطر عليه الى السرعات المطلوبة .

ان احدى اولى الاعتبارات في تبني فكرة محركات البلازما هي مسالة الكفاءة والتي نقصد بها هنا بالكفاءة في كل من عملية تحويل الطاقة المتوفرة الى طاقة حركية للجسيمات في استهلاك مادة دفع (الجسيمات) , اما الاعتبار المهم الثاني فهو مسالة تعادل الشحنات الخارجة . ان عملية تعجيل الشحنات في المحركات التي تستخدم المجالات المغناطيسية يفترض ان ينتج عنها حزم معجلة متعادلة نتيجة كونها اقرب ما تكون الى بلازما حقيقية ولكن عمليات التعجيل باستخدام المجالات الكهرومغناطيسية لا يمكن ان تتم إلا باستخدام نوع واحد من الشحنات في كل مجال ولذلك فان علينا فصل هذه الشحنات عن بعضها قبل التعجيل ولكن قذف نوع معين من الشحنات الى الخارج اثناء عملية الدفع سيؤدي الى بقاء شحنات مضادة في المحرك نفسه مما يؤدي الى ارتفاع جهده ووصوله بعد فترة معينة الى حالة يستطيع معها منع الشحنات المقذوفة من الخروج وبالتالي ايقاف عمل المحرك .

ان معالجة هذا الموضوع تتطلب معادلة الشحنات المقذوفة بأعداد مساوية لها من شحنة مضادة ولا نعني بهذا هنا ان على هذه الشحنات اعادة الاتحاد مع بعضها بل ان المطلوب هو ان تكون مجموعة الشحنات الخارجة متساوية في العدد بالنسبة لكلا النوعين من الشحنات .

ان المشكلة الرئيسية الثالثة تتعلق بتأثير التعرية في الاقطاب المستخدمة عملية التعجيل والناتجة عن تصادم الايونات مع الاقطاب نفسها واحتكاكها بها . ان محركات الدفع التي نحن بصددها يفترض ان تستخدم في سفن فضائية تستمر رحلاتها لعدة سنوات وهذا يتطلب ان تكون ذات تصاميم جيدة يكون تأثير التعرية على الاقطاب الكهربائية قليلا جدا بحيث لا يؤثر على عمل المحرك خلال فترة عمره وهذا يتطلب سيطرة جيدة على طبيعة المسار الضوئي للايونات داخل المحرك بحيث يمنع ارتطام او احتكاك الايونات بالأقطاب بحيث لا تصل نسبة الايونات التي تصطدم بالأقطاب الى اكثر من 0.001 من العدد الكلي للايونات التي يتم تعجيلها .

التعجيل الكهروستاتيكي (electrostatic acceleration):

يتميز التعجيل الكهروستاتيكي يكون علية التعجيل مستقلة بالنسبة لكل من الايونات الموجبة والسالبة اي ان عملية توليد الايونات سوف تتم في مرحلة خاصة قبل عملية التعجيل حيث تتم عملية توليد الايونات اما باستخدام بخار السيزيوم او بالتصادم مع الالكترونات و لكلا هذين النوعين من المحركات احتياجات مشتركة بالنسبة لمعادلة الايونات الخارجة عن طريق حقن شحنات معاكسة .

التعادل الكهربائي (electrical equilibrium):

ذكرنا سابقا بان تعجيل الايونات الموجبة والشحنات السالبة في المحركات التي تعتمد التعجيل الكهروستاتيكي يتم بشكل منفصل ويتم بعد ذلك حقن الالكترونات لمعادلة حزمة الايونات الموجبة وعلى الرغم من ان الاختيار الحقيقي لفعالية عملية التعادل هذه يجب ان ينتظر ما ستعطيه النتائج الميدانية لاستخدام هذا النوع من المحركات في رحلة فضائية فان الكثير من الدراسات التي اجريت في مختبرات على سطح الارض قد اثبتت امكانية نجاح هذه العملية على الرغم من انه لا تزال هناك الكثير من الاسئلة الت تحتاج الى اجابات بهذا الصدد . وعلى الرغم من اهمية التطبيق المباشر لفكرة التعادل الايوني في محركات الدفع الصاروخي في البلازما فان لهذا الموضوع اهمية اخرى كونه يمثل نوعا متميزا من البلازما والتي لها خواص مهمة ذات امكانيات تطبيقية لم تتم دراستها لحد الان .

ان هناك طريقتين اساسيتين للقيام بمعادلة حزمة الايونات المنبعثة من محرك الدفع بالبلازما هما :

1- التعادل بالتيار current neutralization :

ان خروج الحزمة الموجبة التي قذفها من سفينة فضائية معزولة سوف يؤدي الى اكتساب السفينة شحنة كلية سالبة تتزايد بسرعة الى حد تصبح معه كافية لإعادة سحب جميع الايونات المقذوفة ولهذا فان النوع من الضروري قذف عدد مساوي من الشحنات السالبة مع الشحنات الموجبة وهذه الخطوة تعتبر ضرورية لأجل المحافظة على المركبة الفضائية في حالة تعادل كهربائي . ان من الممكن مبدئيا تحقيق هذا الهدف عن طريق قذف جسيمات سالبة كالالكترونات مثلا من اي من اجزاء المركبة حيث ستصل في نهاية المطاف الى السحابة الايونية الموجبة خارج لمعادلتها ويسمى هذا النوع من التعادل بتعادل التيار حيث يعتمد على فكرة جعل المجموع الجبري للتيار الكهربائي الخارج من المركبة مساويا للصفر.

2- تعادل فضاء الشحنة space charge neutralization :

تعتمد هذه الطريقة على معادلة الحزمة الموجبة نفسها عن طريق قذف الالكترونات السالبة مع الحزمة الموجبة من اية نقطة اخرى في المركبة ولا زال موضوع كيفية القيام بهذه العملية موضع بحوث ودراسات كثيرة.

ان الحصول على تعادل الحزمة الكهربائية يتطلب حقن الالكترونات داخل الحزمة الايونية او بالقرب منها . ان الهدف الرئيسي من عملية التعادل هو بالطبع الغاء او تقليل مقدار اي مجال كهربائي بالقرب من الحزمة يمكن ان يؤدي وجوده الى تقليل مقدار الدفع الناتج عن قذف جسيمات الحزمة . ولما كان مقدار الدفع يتناسب مع حاصل ضرب سرعة القذف وعدد الشحنات المقذوفة في كل وحدة زمن والذي يتناسب مع مقدار التيار الكهربائي الذي تحمله الحزمة فان اي مجال يؤدي الى تقليل احدهما سوف يؤدي بالتالي الى تقليل الدفع . ان م يجب ان نتذكره هنا هو ان التمدد العرضي للحزمة بعد تركها للمحرك سوف لا يؤدي الى توليد اي دفع مضاد من هذا النوع .

ان مناقشتنا سوف تتركز على نوعين من الحزم الايونية والتي لها نوعان مختلفان من مشاكل المتعلقة بعملية التعادل .

1. <u>الحزم العريضة المقطع (wide section beams):</u>

تعرف الحزمة العريضة المقطع بأنها تلك الحزمة التي تكون مساحة مقطعها اكبر من مربع المسافة الفاصلة بين المؤين وقطب التعجيل ويمكن اعتباره حزمة مثالية من هذا النوع على انها متولدة عن معجل كبير ذات شبكة . وبسبب شكل هذه الحزمة فان خطوط المجال ستكون باتجاه محوري اي انها تكون باتجاه يمتد بين الايونات الموجبة في الحزمة وبين الشحنات السالبة على السطح الخارجي لقطب التعجيل , اي ان خطوط هذا المجال تعمل على تقليل سرعة الجسيمات المقذوفة وبالتالي الى تقليل كبير في مقدار الدفع . ولو تصورنا وجود شروط حدودية على الحافة الخارجية للحزمة (للتأكد من ان الخطوط هي محورية بالضبط) فان هذه الايونات سوف تتوقف عن الحركة بعد مسافة مساوية للمسافة الفاصلة بين المؤين وقطب التعجيل .

ان استخدام الحزم العريضة المقطع يوفر ميزات مهمة منها ان باستطاعة توليد قوة دفع كبيرة اذا ما تم التغلب على مشكلة التعادل .

2. <u>الحزم الدقيقة (micro beams):</u>

يمكن تعريف الحزمة الدقيقة على انها تلك الحزمة التي تكون فيها النسبة بين مساحة مقطع الحزمة في نقطة خروجها الى مربع المسافة الفاصلة بين المؤين وقطب المعجل اقل بكثير من الواحد . تكون خطوط المجال الكهربائي الناتجة عن شحنة هذه الحزمة مستعرضة على اتجاه الحزمة بشكل عام ولذلك فان تأثير هذه الخطوط على الحزمة سيكون عبارة عن تشتيت وتفريق الحزمة بالاتجاه المستعرض بدلا من تقليل سرعة جسيماتها في الاتجاه المحوري وبذلك تستطيع حزمة من هذا النوع السير مسافة كبيرة بعد خروجها من المحرك بدون الحاجة الى ان تكون متعادلة ولكن لهذا النوع من الحزم عيبا مهما وهو ان مقدار الدفع الذي تولده سيكون صغيرا بحيث يصبح من غير العملي استخدامها في الرحلات الفضائية .

ان معظم المحركات التي تجري دراسة خواصها في الوقت الحاضر لا تمثل حزمات دقيقة ولا عريضة بل تكون في وضع يقع ما بين هذين الترتيبين اما السؤال الذي يطرح نفسه الان فهو كيف نستطيع اجراء عملية الخلط بين المكونات الحزمة الموجبة والالكترونات لتكوين حزمة متعادلة ان شرط التعادل يتطلب كون مقدار التيار الايوني مساويا للتيار الالكتروني , اي ان :

$$I_i = q_i \upsilon_i = -I_e = -q_e \bar{\upsilon}_e$$

حيث تمثل q مقدار الشحنة لكل وحدة طول للايونات او الالكترونات في الحزمة , υ مقدار السرعة , $\bar{\upsilon}$ معدل السرعة .

وفي حالة حدوث التمازج بين الشحنات الموجبة والالكترونات بشكل منتظم فان كثافة التيار الايوني ستكون مساوية لكثافة التيار الالكتروني اي ان :

$$J_i = \rho_i \upsilon_i = -J_e = -\rho_e \bar{\upsilon}_e$$

ولكننا لا نعلم حقيقة فيما اذا كان التعادل يجب ان يكون على المستوى المايكروسكوبي او الماكروسكوبي العيني للحزمة حيث ان هذا ستحدده مقدار اللاستقراريات التي قد تحدث في البلازما .

ان العلاقة تتطلب كون سرعات الايونات والالكترونات متساوية ولكن السؤال التالي الذي يطرح نفسه سيكون هل ان هذا التساوي في السرعات يجب ان تحقق على اساس مطلق بحيث تكون جميع الالكترونات متحركة باتجاه الايونات ونفس مقدار سرعتها فيما اذا كان من الكافي ان يكون معدل سرعات الالكترونات مساويا لمقدار سرعة الايونات وباتجاهه . ان هذا الموضوع لا يزال خاضع لدراسات كثيرة ومكثفة لهدف الحصول على افضل صيغة هندسية وفيزيائية لتحقيق عملية التعادل ولكن ومن الجدير بالذكر ان تولد ونمو اللاستقراريات في حزمة البلازما الخارجة عند مزج الايونات مع الالكترونات يعتبر حاليا من اهم العوامل التي تجري دراستها في الوقت الحاضر .

محرك السيزيوم الايوني (cesium ion engine):

يبين الشكل ... رسما تخطيطيا لنموذج محرك السيزيوم الايوني ونلاحظ على الجهة اليسرى منه مجموعة المعدات الخاصة بمخزن وتسخين الوقود والتي يتم فيه تسخين السيزيوم وتحويله الى بخار ليندفع بعد ذلك خلال صمام التحكم الى المؤين حيث يتحول بخار السيزيوم عند مروره بالمؤين الى الحالة الايونية ويتم بعد ذلك تعجيل هذه الايونات باستخدام المجالات الكهروستاتيكية في منطقة المعجل لتقذف بعد ذلك خلال المعادل حيث يتم معادلة الحزمة بالالكترونات عن طريق كاثود يحيط بالحزمة حيث تتم عملية يحيط بالحزمة حيث تتم عملية التعادل في هذه المنطقة .

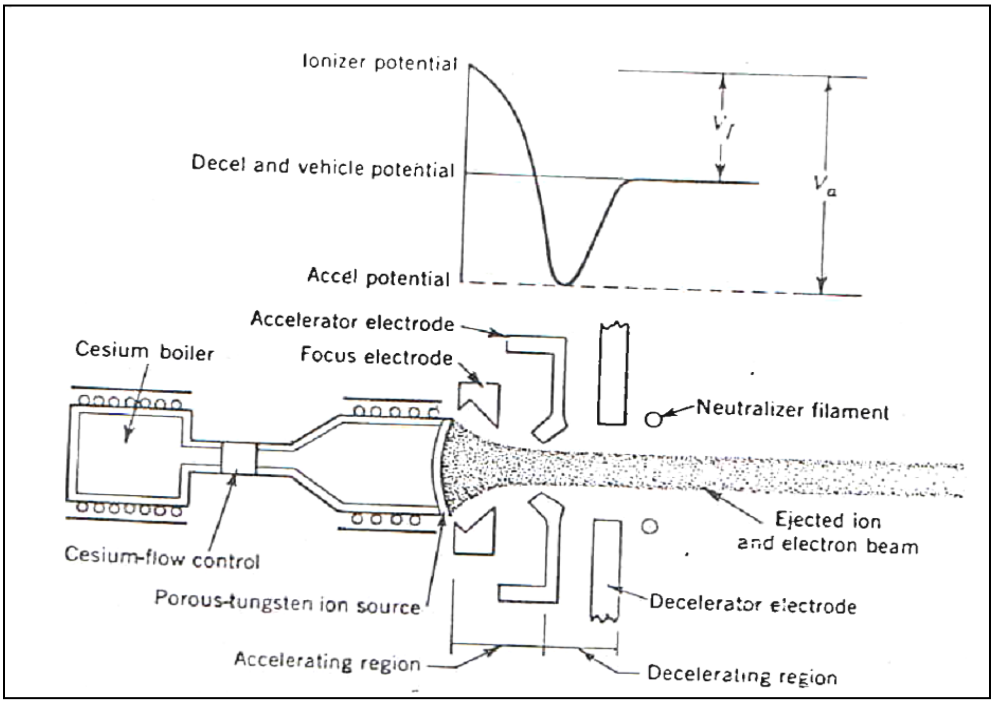
ام مجموعة الاقطاب المسماة منطقة المعادل في الشكل ... تؤدي وظيفيتين هما :

ان شكل وجهد الاقطاب التي تم تصميمها بهدف الحصول على اقصى كفاءة حقن للالكترونات لأجل التعادل .

ان معدل جهد هذه الاقطاب يكون اكبر عادة من جهد القطب المعجل وذلك لأجل ابطاء الايونات . ان ترتيب (التعجيل – الابطاء) هذا اصبح مستخدما في معظم المحركات الايونية الحديثة حيث يتم قذف الحزمة الى الخارج عند جهد مقداره V_f يمثل جهد القطب المبطئ في حين يكون جهد القطب المعجل الواقع بين قطب الابطاء والمؤين سيكون مقداره V_a حيث تسمى النسبة V_a / V_f بنسبة التعجيل والإبطاء accel- decal ratio وتتراوح قسمة هذه النسبة بين 2-10 . ان الغرض الكامن وراء هذا الترتيب هو توليد توزيع للجهد على طول الحزمة لمنع الالكترونات المحقونة لمعادلة الحزمة من الانجذاب نحو منطقة المعجل والوصول حتى المؤين والذي قد يؤدي الى خسارة في القدرة .

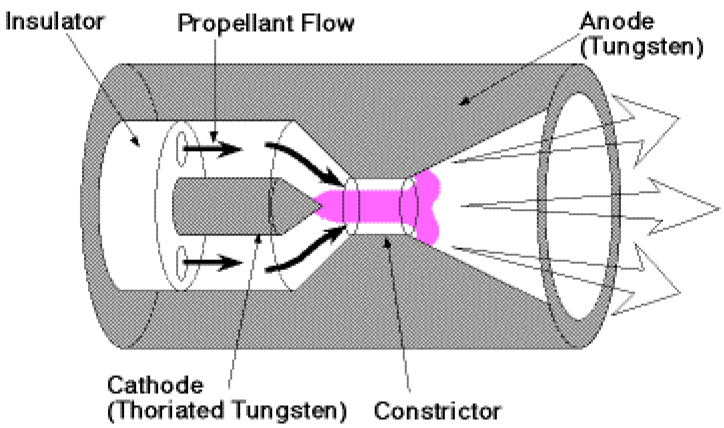
هناك عدة اشكال هندسية مستخدمة في تصميم المؤين وبالتالي تصميم المحرك ككل ويمكن تقسيم هذه الاشكال الى :

1) الشكل المستوي .
2) مجموعة الحزم الدائرية الصغيرة .
3) ترتيب الحزم الشريطية .
4) ترتيب الحزمة القشرة الاسطوانية .



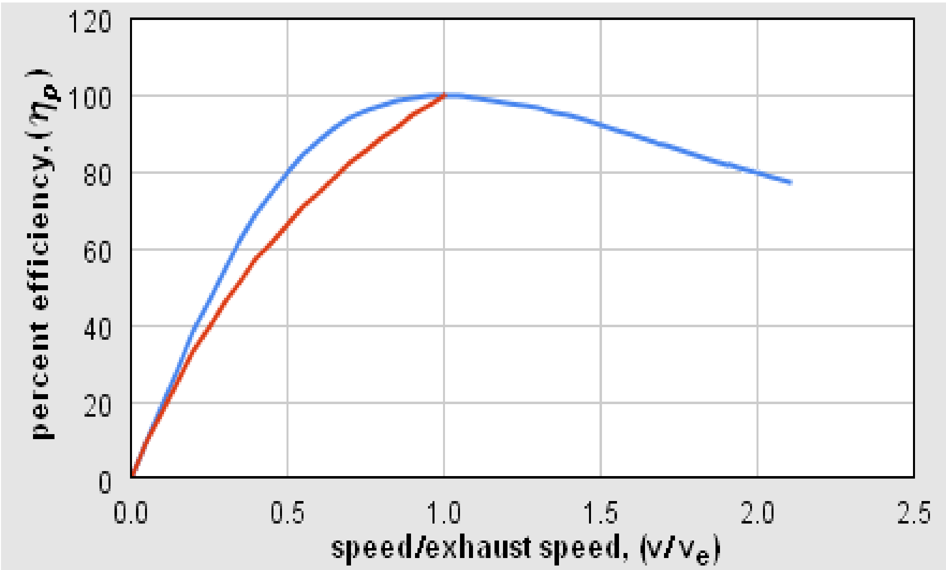
ان اكثر الحزم شيوعا والتي تبدو مناسبة اكثر من غيرها هو ترتيب الحزم الشريطية حيث تكون الحزمة بشكل عدة شرائط متوازية والتي تستخدم اجهزة تجميع في اتجاه واحد بدلا من الحاجة الى عملية التجميع في اتجاهين في حالة الحزم الدائرة المقطع كما ان تأثر الاقطاب بفعل التعرية الايونية في هذا النوع من الحزم سيكون اقل .

تمثل عملية تحويل ذرات السيزيوم المتعادلة الى ايونات في المؤين (عملية التأين) احدى العمليات المهمة , ومن الطرق التطبيقية المستخدمة لتحقيق ذلك , يتم تغذية المؤين ببخار السيزيوم من الجهة اليسرى لتمر خلال المسارات الشعرية الدقيقة لقرص من التنكستن المسامي لتخرج على السطح من الجهة الاخرى للقرص بشكل ايونات عن طريق التأين مع التنكستن . ان مقدار التيار يزداد بزيادة الفولتية السالبة لتنكستن عند الفولتيات السالبة القليلة حتى يصل الى حد الاشباع (الحجم الذي يتم فيه تأين جميع ذرات التي تمر خلال التنكستن) . ان السيطرة على عدد هذه الذرات يمكن من خلال التحكم في ضغط بخار السيزيوم .



تعتبر عملية السيطرة الدقيقة على مسارات الايونات بحيث يكون مجراها منتظما وهادئا خلال منطقة المعجل والمعادل عملية ذات اهمية قصوى للمحافظة على نسبة تصادم مع الاقطاب لا تزيد عن 10^{-3} . لن التقنية المتبعة في هذا المجال مشابهة لتلك التي تستخدم في تصميم العدسات البصرية ذات الزيغان الضوئي الواطئ والعدسات الالكترونية .

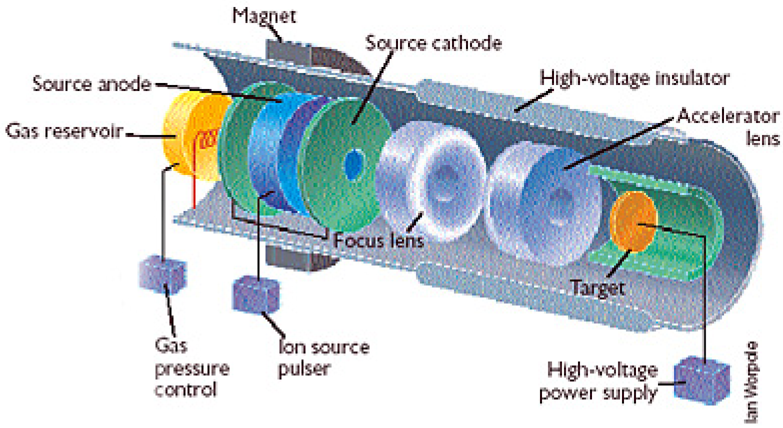
لقد تم بناء عدد من محركات السيزيوم في مختبرات البحوث الخاصة بالدفع الصاروخي بالبلازما وفق تصاميم عالية الدقة وقد تم الحصول منها على حزم ايونية تزيد كثافتها على 10^{11} ايون / سنتمتر مكعب مما يمثل تيارات كهربائية تصل كثافتها الى بضع عشرات او حتى مئات ملي امبير لكل سنتمتر مربع تمت معادلتها بنجاح كبير قدر تعلق الامر بالاختبارات التي اجريت في المختبرات على الاقل ويمكن القول بان محرك السيزيوم يمكن ان يكون كفوًا الى حد كبير في تحويل الطاقة حيث ان المصدر الرئيسي للخسارة في الطاقة سيكون من خلال الحرارة التي تعطى لتسخين المؤين الى درجة الحرارة اللازمة اضافة الى مقدار اخر من الحرارة لتوليد الالكترونات في المعادل بالتأثير الايوني – الحراري . ونلاحظ من دراسة الشكل ... ان كفاءة تحويل الطاقة η_p تزداد خطيا تقريبا بزيادة النسبة (سرعة البلازما / سرعة خروجها) البلازما v/ve حتى حوالي 80% .



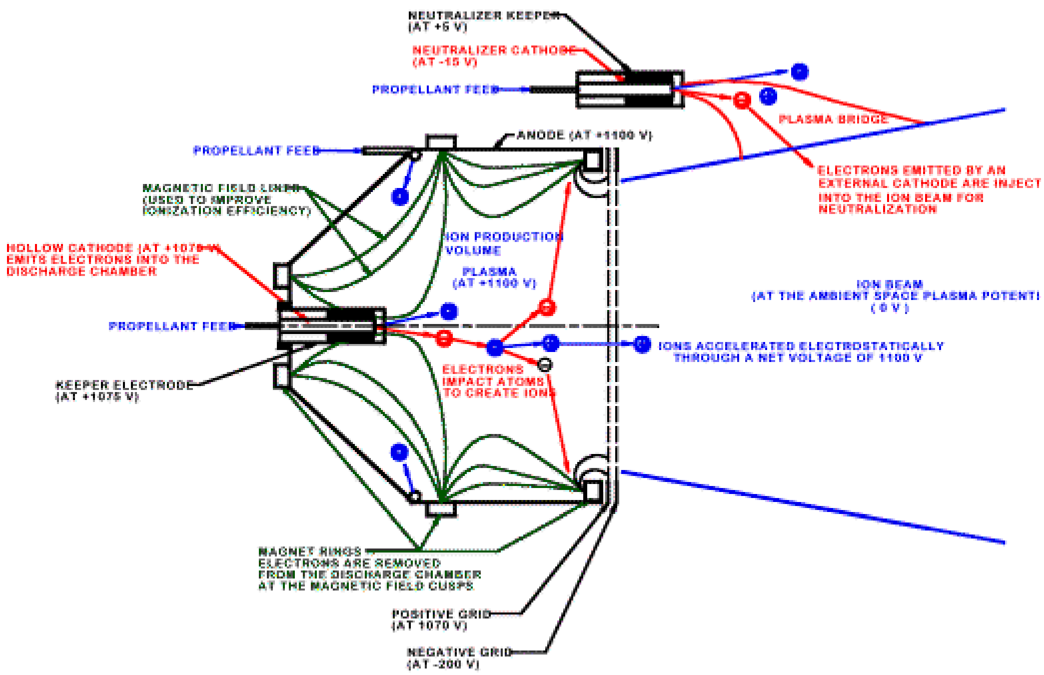
محرك بينيك للتفريغ الايوني :

ان النوع الثاني من المحركات الكهروستاتيكية هو محرك يستخدم مبدأ مختلفا تماما عن المبدأ المستخدم بالنسبة لميكانيكية التأين حيث يتم احداث التأين في هذا النوع من المحركات باستخدام عملية التصادم مع الالكترونات المنبعثة عن طريق التأثير الحراري – الايوني . ولان معدل طول المسار الحر للالكترونات عند الكثافات الغازية المستخدمة في هذا النوع من المصادر الايونية هو اكبر من اطوال الابعاد الهندسية للمصدر نفسه فان احداث التأينات بكفاءة عالية عن طريق التصادم يتطلب زيادة المسافات التي تقطعها الالكترونات ويتم ذلك عن طريق استخدام مجال مغناطيسي يقوم بحبس الالكترونات بمساعدة مجالات كهربائية . ان هذا الترتيب يؤدي الى كفاءة عالية في استخدام الطاقة لأغراض التأين اضافة الى بساطة التصميم الميكانيكي للجهاز وإمكانية استخدام غازات اخرى غير السيزيوم .

ان اكثر النتائج تشجيعا قد تم الحصول عليها باستخدام الترتيب الموضح في الشكل ... حيث يتكون من حجرة التأين الاسطوانية التي يتم ضخ غاز الدفع المتعادلة عند احدى النهايتين ليتم تأينها وخروجها من الجهة الثانية عن طريق حصرها واحتواءها باستخدام المجال المغناطيسي وكذلك جعل الجزء المركزي من الاسطوانة موجبا بالنسبة للنهايات لمنع تسرب الالكترونات في الاتجاه الطولي وبذلك سوف تسلك مسارات حلزونية داخل الاسطوانة مؤدية الى تحول الذرات المتعادلة الى بلازما تملا الاسطوانة حيث يتم سحب الايونات من هذه البلازما عند نهاية الاسطوانة باستخدام مجموعة من اقطاب معجلة .



تعتمد طاقة الالكترونات المستخدمة عادة على نوع الغاز المستخدم ومقدار طاقة تأينه بالذات وأكثر الغازات شيوعا في الاستخدام هو بخاري السيزيوم والزئبق . ويوضح الشكل ... جهازا من هذا النوع يستخدم الزئبق ككاثود يقوم بتوفير الالكترونات احداث التأين في نفس الوقت الذي يوفر الذرات اللازمة لعمل الجهاز ويوفر هذا الترتيب حل مشكلة عمر الكاثود حيث لا يؤدي استخدام الزئبق بشكل سائل اي مشكلة تخفض عمر الكاثود .

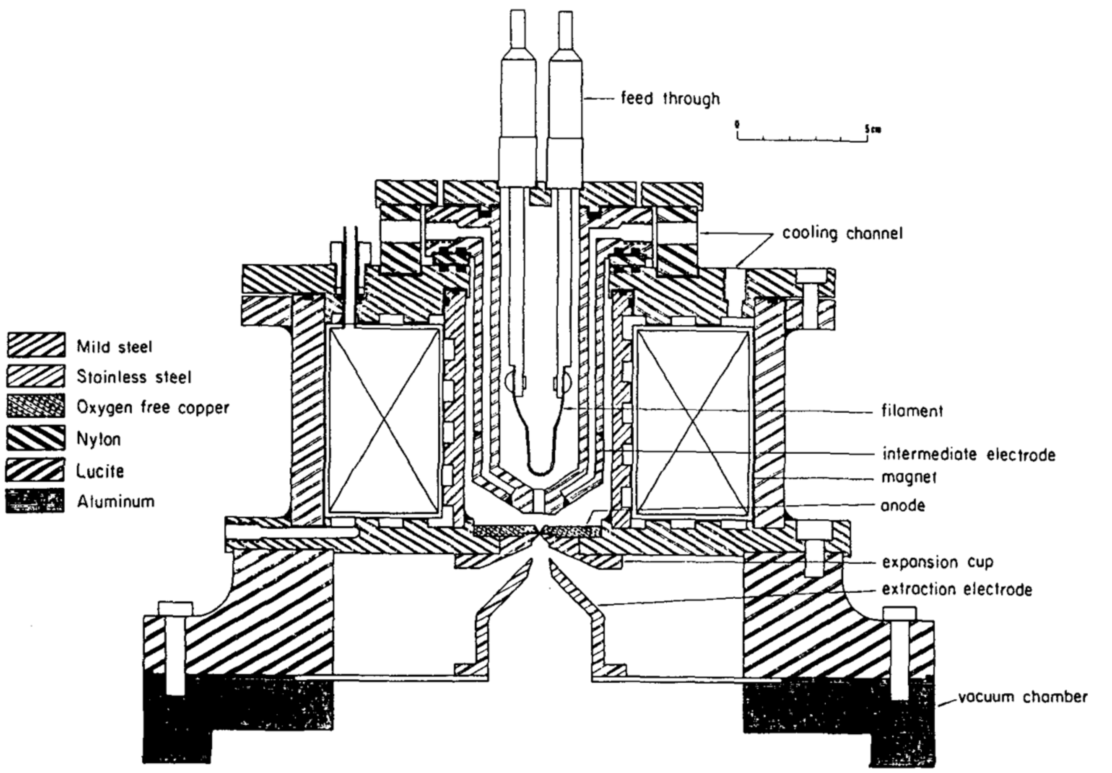


ولقد اجريت تجارب عديدة على هذا النوع من المحركات حتى وصلت خلالها كفاءة استخدام الوقود الى حوالي 80% في حين وصلت كفاءة تحويل الطاقة الى حوالي 90% ووصل مقدار قوة الدفع في احد المركبات الى اكثر من 0.1 نيوتن .

محرك الدوبلازماترون الايوني :

يمثل محرك الدوبلازماترون الايوني الصنف الثالث من المحركات التي تجري تطويرها لإنتاج الحزم الايونية باستخدام التعجيل الكهروستاتيكي . يتم احداث التأين في هذا النوع من المحركات عن طريق التصادم الالكتروني كما هي الحالة في محرك بينينك ولكن الدوبلازماترون يمثل نوعا من المحركات له قدرة كبيرة على انتاج حزم ايونية ذات كثافة تيار عالية جدا بالمقارنة مع المحركات التي سبق ذكرها حيث يمكن الوصول فيه الى كثافات للتيار تصل الى عشرات الامبيرات لكل سنتمتر مربع . ان هذه الخاصية اضافة الى خاصيته الاخرى المتمثلة في ان له كفاءة تأين عالية تجعله مرشح جدا للاستخدام في اي نظام للدفع الصاروخي على الرغم من وجود مشاكل متعددة تتعلق بتأثير التعرية وتجميع الحزمة الخارجة لكن المعتقد ان معالجة هذه المشاكل سوف لا تكون مستحيلة .

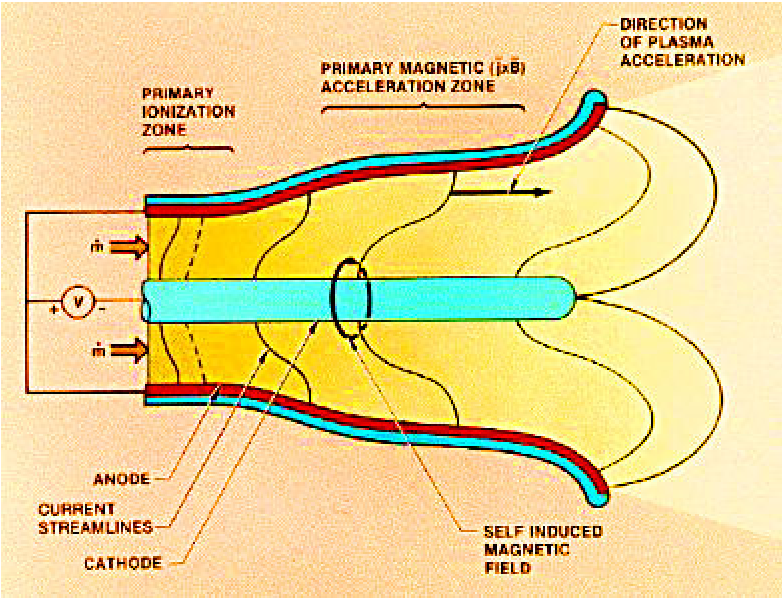
يوضح الشكل ... الترتيب الاساسي لتركيب الدوبلازماترون حيث تتم توليد قوس تفريغ كهربائي تحت ضغط واطئ بين سلك التسخين الايوني الحراري او الكاثود الساخن وبين الانود الذي يعمل عند جهد يزيد عن جهد تأين الغاز المستخدم قد يصل جهد الانود في بعض الحالات الى 100 فولت . ان وجود القطب الوسطي المخروطي الشكل الذي يكون ذا جهد موجب متوسط سيعمل على احتواء البلازما وزيادة كثافتها بالتعاون مع المجال المغناطيسي المحوري مما سيؤدي الى تكوين بلازما عالية الكثافة داخل حجرة التفريغ ويساعد هذا الترتيب في هذا الجهاز في تقليل نسبة فقدان وتسرب الذرات المتعادلة . اما القطب الثالث في هذا الجهاز فهو قطب التعجيل الذي يقع خارج حجرة التفريغ ويعمل عند جهد عالي يصل الى بضع عشرات الالوف من الفولتات .



ان قوس التفريغ الكهربائي داخل الجهاز هو عبارة عن قوس تفريغ اعتيادي تحت ضغط واطئ حيث يكون فيه معدل طول المسار الحر للالكترونات من نفس مرتبة ابعاد طول التفريق وتقوم صفيحة البلازما الموجبة القريبة من الكاثود بتوفير فرق جهد مقارب لقيمة جهد التأين الغازي تلي هذه المنطقة منطقة اخرى ذات انحدار قليل في الجهد توجد فيها البلازما المتعادلة ويكون الضغط في هذه المنطقة بحدود 10^{-2} torr .

ان كثافة البلازما عند هذا الضغط سوف لا تكون كافية عادة لإعطاء تيارات ايونية ذات كثافة عالية ولذلك فان كثافات عالية سيتم من خلال استخدام المجال المغناطيسي الذي يقوم بأداء مهمتين الاولى احداث عمليات الانعكاس المحوري للالكترونات والتالية هو توليد ضغط مغناطيسي لاحتواء البلازما ويؤدي كلا التأثيرين الى زيادة كثافة البلازما .

يوضح الشكل ... توزيع خطوط المجال المغناطيسي في هذه منطقة قناة خروج الغازات قرب الانود . ان المجال والذي تكون شدته في هذه المنطقة بضعة وحدات كيلو جاوس يمكن اعتباره مرآة مغناطيسية تتعرض فيها الالكترونات التي لها مركبة سرعة في الاتجاه المستعرض لعملية انعكاس حيث تتعرض معظم الالكترونات للانعكاس بفعل هذه المرآة مما يؤدي الى حبس الالكترونات بدرجة كبيرة مما يؤدي الى زيادة عالية في درجة التأين للبلازما . اضافة الى ذلك سيقوم بدور مهم في احتواء البلازما والسماح لها في حالة واحدة وهي عندما تكون سرعات الجسيمات المنفلتة في اتجاه محوري فقط تقريبا . ان تأثير الاحتواء الناتج عن المجال المغناطيسي في قناة الانفلات سيكون زيادة كثافة تيار البلازما بشكل كبير.



ان تأثير هذا المجال على الالكترونات هو اشد من تأثيره على الايونات الموجبة (بسبب فرق الكتلة) ولذلك فان التيار الخارج سيكون تيارا موجبا ولكن زيادة طول قناة الانفلات يمكن ان يؤدي الى الاقتراب اكثر فأكثر من وضع التعادل وتشير التقديرات الى ان درجة حرارة الالكترونات في منطقة القناة قد تصل الى 10^5 درجة مطلقة .

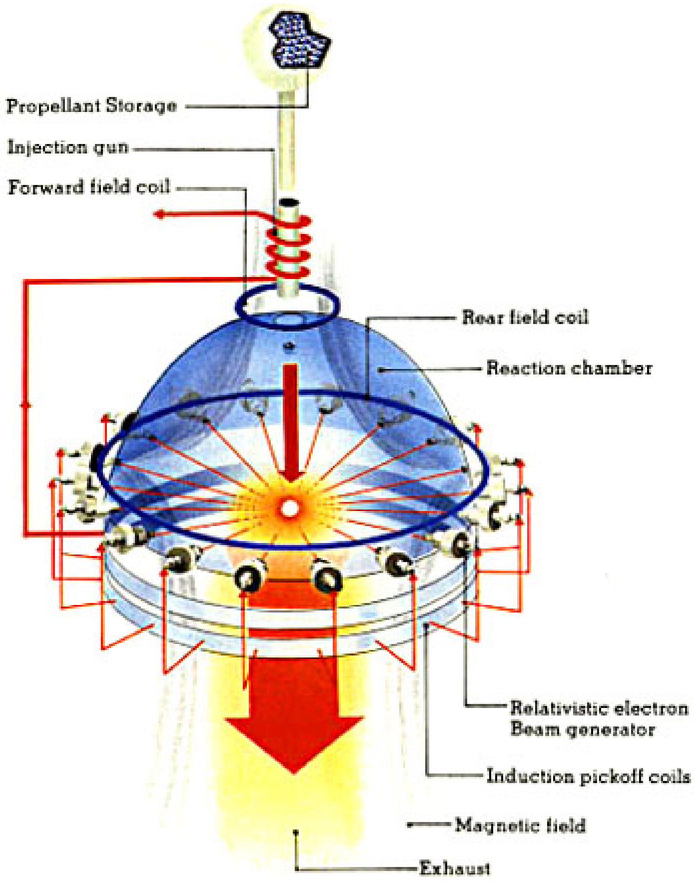
لقد دلت النتائج التي تم الحصول عليها من هذا النوع من الاجهزة ان من الممكن الوصول الى كفاءة في استخدام الوقود تصل الى 90% في حالة استخدام الزئبق في حين وصلت كثافة التيار في نقطة انفلات البلازما اكثر من 100 ملي امبير/ سنتمتر مربع .

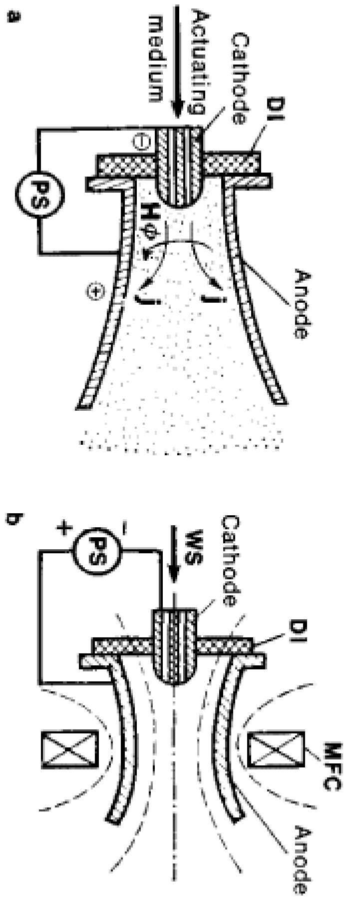
ان المشاكل المتعلقة بهذا النوع من الاجهزة تتركز في مشاكل عمر الاقطاب الكهربائية وتأثيرات التعرية في قناة انفلات البلازما حيث ان زيادة مساحة مقطع قناة الانفلات سيؤدي بالضرورة الى تقليل شدة المجال المغناطيسي المتوفر في هذه المنطقة في حين سيؤدي زيادة شدة المجال لمساحات كبيرة الى تقليل كفاءة تحويل الطاقة في الجهاز وقد يتم التغلب على هذه المشكلة باستخدام المغانط ذات التوصيلية الفائقة .

محركات التعجيل المغناطيسي للبلازما

التعجيل باستخدام المجال المغناطيسي الثابت

يوضح الشكل ... مخططا لتعجيل البلازما باستخدام المجالات المغناطيسية الثابتة حيث يقوم التيار الالكتروني بالمرور خلال البلازما التي يراد تعجيلها ثم يتم تجميع هذا التيار الالكتروني من قبل الانود . ان وجود المجال المغناطيسي الثابت والتي يؤثر في الاتجاه العمودي على كل من اتجاهي حركة البلازما والتيار الالكتروني سيؤدي الى ظهور قو مغناطيسية مقدراها $\bar{f} = \bar{J} \times \bar{B}$ لكل وحدة حجم تؤثر على البلازما وهذه القوة ناتجة عن حركة التيار الالكتروني .





ان التأثير الحقيقي في احداث التعجيل سينتج عن التصادمات بين البلازما والالكترونات في التيار الالكتروني ولهذا فان هذه التصادمات ستؤدي اضافة الى احداث التعجيل الى تسخين البلازما نتيجة للمقاومة النوعية المحدودة للبلازما σ ولذلك فان من المهم معرفة التأثيرات التالية في هذا التعجيل .

1- مدى تأثير اهمية التسخين الذي يحدث في البلازما .
2- مقامة تأثير التسخين مع التأثير الخاص بانتقال الطاقة الحركية الى البلازما بتأثير قوة لورنتز .
3- معرفة الحدود الاساسية فإننا سنحاول حساب كفاءة تحويل الطاقة الكهربائية للتيار الالكتروني الى طاقة دفع في البلازما .

ان مقدار الطاقة الحركية التي يكتسبها البلازما في كل وحدة زمن اثناء مرورها بالجهاز هي :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}M\upsilon^2\right)=\frac{d}{dv}\left(\frac{1}{2}Mv^2\right)\frac{dv}{dt}$$

$$=Mv\frac{dv}{dt}=T(v_2\text{-}v_1)$$

وعلى اعتبار ان T هي مقدار الدفع الذي توله البلازما عند تغير سرعتها من v_2 الى v_1 خلال وحدة زمن واحدة .

ان هذه الطاقة سوف يتم تجهيزها من التيار الكهربائي الالكتروني ولذلك فان من الممكن حسابها بواسطة الشغل الذي تنجزه قوة لورنتز على البلازما خلال وحدة زمن واحدة . ان مقدار الشغل لكل وحدة حجم من البلازما هو :

$$\frac{dW}{dt}=\frac{d}{dt}\int \bar{f}\times d\bar{x}$$

$$=\frac{d}{dt}\int (\bar{J}\times\bar{B})\times d\bar{x}$$

ولما كانت الاتجاهات J , B , dx متعامدة فان :

$$\frac{dW}{dt} = \frac{d}{dx}\int JB\ \frac{dx}{dt}\ dx = JBv|_{v_1}^{v_2} = JB\ (v_2 - v_1)$$

وهذه تمثل مقدار الطاقة لكل وحدة في كل وحدة زمن ولذلك فان مقدار الطاقة الكلية لكل وحدة زمن ما باستخدام المعادلة ... سيكون :

$$u_k = JBV\ (v_2 - v_1) = T\ (v_2 - v_1)$$

حيث V هو الحجم الكلي المصور بين الاقطاب والواقع تحت تأثير المجال امغناطيسي ويمكن اعادة المعادلة ... بدلالة التيار I بدلا من كثافة التيار بالشكل :

$$u_k = JBh\ (v_2 - v_1) = T\ (v_2 - v_1)$$

حيث تمثل h المسافة بين القطبين الكهربائيين وعلى اعتبار ان V=Ah حيث A هي مساحة سطح الاقطاب الكهربائية .

ونعود الان لحساب القدرة الضائعة خلال عملية التسخين وهذه القدرة هي :

$$u_j = R_p I^2$$

وباستخدام العلاقتين ... و ... يمكننا حساب كفاءة تحويل الطاقة من محرك البلازما ذات التعجيل المغناطيسي وهي :

$$\varepsilon = \frac{u_k}{u_k + u_j} = \frac{1}{1 + \frac{R_p}{hB\ (v_2 - v_1)} I}$$

او من الممكن كتابة نفس المعادلة بدلالة الدفع باستخدام الشطر الاول من المعادلة ... حيث :

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + R_p\left[\frac{T}{h^2B^2\ (v_2 - v_1)}\right]}$$

ان هذه العلاقات هي علاقات تقريبية جدا هناك تأثيرات عديدة اخرى لم يتم اخذها بنظر الاعتبار مثل تأثيرات النهايات وتأثير هال ولكن مع ذلك هذه العلاقات هي كافية جدا لإعطائنا فكرة واضحة عن حدود امكانيات من هذا النوع من المحركات .

ان من المفيد التعبير عن المقاومة الكهربائية الكلية R_p للبلازما بدلالة المقاومة النوعية او بالأحرى التوصيلية النوعية σ للبلازما وبذلك على اعتبار ان هذه التوصيلية هي ثابتة خلال البلازما فان معادلة الكفاءة ستصبح :

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \left(\frac{T}{\sigma B^2 \; [V(v_2 - v_1)]} \right)}$$

ويمكننا الان ومن خلال ملاحظة المعادلة ... القول بأنه ولغرض زيادة كفاءة المحرك علينا اختيار القيم المثلى لكل من σ و B وحجم المحرك V ولذلك لان مقدار الدفع T هو امر مفروض تحدده مطالب الرحلة وهذا بدوره يؤدي الى اعتبار قيمة v_2 مقدارا مفروضا ايضا اذا تذكرنا ان قيمة v_2 هي اكبر بكثير من v_1 بحيث يمكن اهمال تأثير v_1 في العلاقة اعلاه.

وحسب المعادلة ... فان الهدف يجب ان يكون زيادة σ وحاصل الضرب VB^2 الى اقصى ما يمكن .

ان زيادة التوصيلية الكهربائية σ للبلازما يخضع لتأثيرات اخرى دراستها معرفة الطريقة التي يتم بها حقن البلازما الى منطقة التعجيل . ان الطريقة المتبعة عادة هي استخدام احد الفلزات القلوية كالسيزيوم عادة لخفض درجة حرارة التأين لدرجات تتراوح ما بين 5000 و 10000 درجة كطلقة فان مقدار التوصيلية سيكون بحدود 10 مهو/ سم ولا يمكن تقليل التوصيلية عن هذا الحد تأثير الدرجات الحرارة الاعلى على المواد البنائية المستخدمة وعمر استخدامها .

معجلات المجالات المتناوبة :

يبدو لنا من المناقشة التي وردت في الفقرة السابقة بان المشكلة الرئيسية في معجلات المجال المغناطيسي الثابت تتعلق بحالة التماس الموجود بين البلازما الساخنة والأقطاب الكهربائية . ان هناك امكانية لتجنب هذا النوع من المشاكل في نفس الوقت الذي يتم الاستمرار فيه باستخدام التعجيل المغناطيسي الناتج عن قوة لورنتز $\bar{J} \times \bar{B}$ من خلال القيام بتوليد تيارات كهربائية بطريقة الحث في البلازما عن طريق استخدام مجالات متغيرة مع الزمن (متناوبة) والتخلص مبدئيا على الاقل من الحاجة الى وجود تماس فيزيائي بين البلازما والأقطاب . ان هذه المجالات المتناوبة ستكون ذات فائدة اخرى هي امكانية توليد قوى معجلة في البلازما بدون الحاجة الى حدوث تصادمات بين الجسيمات عكس ما هو عليه في حالة استخدام المجالات الثابتة كما ذكرنا ولذلك فان من الممكن استخدام بلازما ذات توصيلية كهربائية عالية نسبيا .

ان من الممكن تقسيم المجالات المغناطيسية المتناوبة المتوفرة لتعجيل البلازما الى نوعين رئيسين هما مجالات الموجات المتحركة magnetic travelling wave ومجالات الموجات المستقرة magnetic standing wave .

هناك ثلاث انواع من معجلات المجالات المغناطيسية باستخدام الموجات المتحركة وهي :

1. معجلات البلازما ذات المكبس المغناطيسي magnetic piston
2. معجلات دفعات البلازما plasma bunch accelerators
3. معجلات البلازما الحلقية ring accelerators

معجلات البلازما ذات المكبس المغناطيسي :

لقد توصلنا الى ان وجود البلازما في مجال مغناطيسي سوف يؤدي الى توليد ضغط احتواء على البلازما مقداره :

$$p = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

في حالة اعتبار التوصيلية الكهربائية النوعية للبلازما مقدارا لانهائيا بحيث لا تقوم خطوط المجال المغناطيسي بالنفوذ داخل البلازما وفي هذه الحالة فان تأثير الضغط سيكون على الصحيفة الخارجية لجدار البلازما .

ان من الممكن كتابة هذه العلاقة في حالة كون التوصيلية الكهربائية للبلازما σ مقدارا محدودا بحيث تستطيع بعض خطوط المجال من النفاذ الى داخل البلازما فإذا افترضنا ان شدة المجال خارج البلازما هي B_1 وشدة المجال داخل البلازما هي B_2 فان الضغط المغناطيسي على البلازما سيكون :

$$p = \frac{1}{2\mu_0}(B_1^2 - B_2^2)$$

ومن الجدير بالملاحظة هنا ان هذا الضغط ناتج في الواقع عن تأثير قوة لورنتز $\bar{J} \times \bar{B}$. ان اقصى قيمة للضغط المغناطيسي ستكون طبعا عندما يتم منع خطوط المجال من النفوذ داخل البلازما وبمعنى اخر فان انتشار خطوط المجال داخل البلازما يجب ان يكون بطيئا جدا بالمقارنة مع الفترة الزمنية اللازمة لتعجيل البلازما ولغرض توضيح اساس فكرة التعجيل باستخدام المكبس المغناطيسي فان علينا ان نناقش مسالة انتشار خطوط المجال داخل البلازما وللحصول على معادلة الانتشار فان باستطاعتنا استخدام صيغة قانون اوم العام :

$$\bar{J} = \sigma_0 \,(\bar{E} + \bar{u} \times \bar{B})$$

وبإعادة ترتيب الحدود في هذه المعادلة واخذ قيمة الالتفاف للطرفي نحصل على :

$$-\nabla \times \bar{E} \;=\; -\,\nabla \times \,(\bar{u} \times \bar{B}) \;-\; \frac{1}{\sigma_0}\,\nabla \times \bar{J}$$

وبالتعويض عن J , $\nabla \times E$ من معادلات ماكسويل واستخدام المتطابقة الاتجاهية :

$$\bar{\nabla} \times \,(\bar{\nabla} \times \bar{B}) \;=\; -\,\nabla^2 B$$

نحصل على :

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \bar{\nabla} \times \,(\bar{\nabla} \times \bar{B}) + v_m \nabla^2 \bar{B}$$

حيث ان v_m تسمى باللزوجة المغناطيسية او معامل انتشار خطوط المجال في البلازما . وتساوي :

$$v_m = \frac{1}{\sigma_0 \mu_0}$$

ان الحد الاول تسمى بحد الجريان ام الحد الثاني فيسمى بحد الانتشار وفي حالة كون البلازما ثابتة (ليس هناك جريان) فن معادلة انتشار خطوط المجال ستصبح :

$$\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = \frac{1}{\sigma_0 \mu_0} \nabla^2 \bar{B}$$

والآن لو افترضنا ان الوقت المتوفر لدينا لتعجيل البلازما هو τ وان المسافة التي يمكن لخطوط المجال الانتشار فيها الى عمق l داخل البلازما خلال هذه الفترة الزمنية وان v_d معدل سرعة انتشار الخطوط هذه الفترة فان الشرط الذي يجب ان تحققه بشان اقصى سرعة انتشار سيكون :

$$v_d \tau < l$$

ولكن وبما ان :

$$v_d \approx \frac{1}{l\,\sigma_0 \mu_0}$$

فان :

$$\frac{1}{\sigma_0 \mu_0} < \frac{l^2}{\tau}$$

ان الوقت المتوفر للتعجيل خلال مسافة مقدارها L للوصول الى سرعة نهائية مقدارها v_p ابتدأ من وضع قريب من السكون هو :

$$\tau = \frac{2L}{v_p}$$

وبالتعويض من المعادلة ... في العلاقة ... نحصل على

$$\frac{1}{\sigma_0} \leq \mu_0 \frac{l^2 v_p}{2L}$$

والذي يمثل الشرط الذي يجب ان يتحقق لأجل الحصول عل تعجيل البلازما الى سرعة نهائية مقدارها v_p خلال مسافة مقدارها L مع عدم السماح لخطوط المجال بالانتشار الى عمق اكبر من l داخل البلازما ولأجل اخذ فكرة حول معنى هذا الشرط سنفترض القيم التقريبية التالية :

$$l = 10^{-2} m$$
$$2L = 0.5m$$
$$v_p = 10^5 mho / m$$
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H / m$$
$$\sigma_0 > 4 \times 10^{-6} m$$

وهذا معناه بلازما ذات درجة حرارة تصل الى 70000 درجة مطلقة .

ان هذه الحسابات هي تقريبية طبعا وهدفها اعطاء فكرة عن متطلبات تعجيل البلازما باستخدام فكرة المكبس المغناطيسي . ان هذا الحرارات يمكن الوصول اليها مبدئيا ولهذا فا فكرة النوع من التعجيل هي ليست مستحيلة .

ان احتواء البلازما في اي جهاز يستخدم مبدأ المكبس المغناطيسي يتطلب حل مشكلة درجة الحرارة العالية والتي من اهم الحلول هو عن طريق احتواء البلازما بواسطة مجال مغناطيسي ثابت يسمى بمجال الانحياز يقوم باحتواء البلازما ويمنع تماسها مع الجدران المادية للمعجل ولكن ما تجب ملاحظته هنا هو انه وعندما يكون اتجاه المجال امتناوب للمكبس المغناطيسي موازيا لمجال الانحياز الثابت فانه هذا سيولد ثقبا في المكبس المغناطيسي بحيث لا يمكن في هذه الحالة تعجيل جميع اجزاء البلازما .

معجل دفعات البلازما :

ان استخدام الموجات المغناطيسية ذات التغير الجيبي مع الزمن سيؤدي الى حبس دفعات من البلازما عند كل نصف طول موجي لموجة المجال في النقاط التي يكون فيهال المجال اقل ما يمكن وبذلك فان البلازما ستتجمع من المناطق المكثفة منتقلة مع المجال المغناطيسي المتحرك وعندما تكون التوصيلية الكهربائية للبلازما عالية بما فيه الكفاية (اقل انتشار لخطوط المجال داخل البلازما) فان هذا سيؤدي الى تعجيل البلازما في نفس الوقت الذي يحاول منعها من الاقتراب من الجدران عدا عند المناطق الوسطى الذي يحدث عنده نضوح محدود للبلازما الى الجدران .

المعجل الحلقي :

وهو لا يختلف كثيرا عن معجل المكبس المغناطيسي ويمكن تطبيق مبدأ الضغط المغناطيسي $p_m = \frac{B^2}{2\mu_0}$ على هذا المعجل ولكن من الافضل مناقشة عمل هذا المعجل عن طريق دراسة التأثيرات المتبادلة بين المجال المغناطيسي والتيار المحتث في حلقة البلازما بواسطة تغير عدد خطوط المجال الموجود ضمن المجال الموجودة ضمن الحلقة نتيجة انزلاق خطوط المجال المغناطيسي للموجة على حلقة البلازما ولأجل احداث تعجيل لهذا النوع من البلازما الحلقية فان الشروط الخاصة بتوصيلية البلازما في حالة المكبس المغناطيسي يجب ان تتوفر هنا ايضا .

التعجيل المغناطيسي النبضي للبلازما :

يمثل الشكل... مخططا لما يسمى مدفع البلازما الهايدرومغناطيسي hydromagnetic plasma وهو يمثل احد انواع المعجلات التي تعتمد طريقة التعجيل المغناطيسي النبضي للبلازما ويتكون من موصلين متحدي المحور مجهزي بترتيب مناسب لإدخال دفعة من الغاز خلال فتحة في القطب الموصل الاسطواني الداخلي حيث يدخل منها الغاز الى المنطقة المحصورة ويتم تسليط جهد كهربائي عالي بين القطبين بشكل مفاجئ عن طريق غلق الدائرة الكهربائية المرتبطة بمتسعات كهربائية ضخمة وبذلك يتم تأين الغاز ويبدأ تيار كهربائي قطري كبير بالمرور مما يؤدي الى تكوين مجال مغناطيسي دائري نتيجة مرور هذا التيار في القطب الاسطواني الداخلي وينتج عن مرور هذه التيارات القطرية في البلازما والمجال المغناطيسي قوة مغناطيسية $\bar{J} \times \bar{B}$ تولد ضغطا مغناطيسيا مقداره $\frac{B^2}{2\mu_0}$ يقوم بدفع البلازما الى الامام بشكل يشابه ما يحدث في حالة المكبس المغناطيسي مع بعض الاختلافات منها ان مرور التيار في هذه الحالة سيكون ناتجا عن التماس المباشر مع الاقطاب بدلا من ان يكون تيارا محتثا . كما ان توليد المجال مغناطيسي سيكون ناتجا عن حركة التيار في الموصل الداخلي بدلا من ان يكون عن موجة مغناطيسية بطيئة .

<u>ان العيوب الرئيسية لهذا النوع من الاجهزة يمكن ان تتخلص فيما يلي :</u>

- صعوبة تحويل الطاقة من المتسعات الى الاقطاب المتحدة المحور .
- فقدان الطاقة المغناطيسية بواسطة الانفلات او الانعكاس عند منطقة نهاية الجهاز .
- الخسارة في القدرة نتيجة التماس المباشر بين البلازما والأقطاب الكهربائية .

لقد تم اجراء عدد من التجارب على هذا النوع من الاجهزة حيث تم الوصول الى سرعات بلازما في حدود 10^5 متر/ثانية باستخدام الهيدروجين وبكفاءات وصلت حوالي 30% بالنسبة لتحويل الطاقة في حين ادى استخدام غازات اثقل من الهيدروجين الى الوصول الى سرعات في حدود 60000 متر /ثانية وبنفس الكفاءة تقريبا .